

## МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ БАГАТОЦЕХОВОЇ КОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ

<sup>1</sup>В.Б.Коток, <sup>2</sup>А.Д.Тевяшев, <sup>1</sup>О.А.Тевяшева

<sup>1</sup> Науково-дослідний проектний інститут автоматизованих систем управління транспортом газу, Україна, м. Харків, вул. Конєва, 16.

<sup>2</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна, м. Харків, пр. Леніна, 14

В статті приведена формальна постановка структурної та параметричної оптимізації режиму роботи компресорного цеху і багатоцехової компресорної станції однониточного магістрального газопровода. Предложено метод решения данной задачи и проведен ряд исследований свойств получаемых решений в зависимости от требуемых параметров режима работы станции. Приведен пример анализа целесообразности оптимизации в конкретных условиях и указаны пути дальнейшего развития исследований в данном направлении.

The formal statement of the problem of multi-shop compressor plant structural and parametrical optimization is stated. The method of its solution is suggested, and qualities of obtained solutions are discussed depending on desired operating practices. As example, the analysis of optimization expediency under variety of conditions is illustrated, and paths of further investigations are denoted.

### Вступ

Задача структурної та параметричної оптимізації режиму роботи компресорної станції виникає як у щоденній практиці диспетчерського управління, так і під час стратегічного або оперативного планування режимів роботи ГТС на рівні ЛПУ або ОДУ МГ [1].

Взагалі оптимізація режиму роботи КС полягає у виборі такої структури станції та параметрів режиму роботи її обладнання, які б забезпечували розв'язуваність задачі стабілізації режиму КС (стабілізації тиску на її виході) засобами локальної автоматики. Задачу стабілізації режиму КС будемо вважати розв'язною, якщо її вирішення можливе шляхом зміни безперервних керуючих параметрів (наприклад, частоти обертання валів ВЦН ГПА) без зміни структури КС.

Варіанти формальної постановки даної задачі [2, 3, 4], що можна знайти в літературі, майже ніколи не супроводжуються викладенням ефективного методу її розв'язання та аналізом властивостей рішень, що отримуються. Саме заповненню цієї прогалини й були присвячені дослідження, результати яких наведено в даній статті.

### Оптимізація режиму роботи компресорного цеху

**Формалізація задачі.** У розрахунку оптимального режиму роботи КЦ заданими будемо вважати: тиск газу на виході цеху  $P_{вих}$ ; продуктивність цеху  $q_{КЦ}$ ; тиск  $P_{вх}$  і температура  $T_{вх}$  газу на вході цеху; температура  $t_a$  і тиск  $P_a$  атмосферного повітря; характеристики ГПА КЦ та множина  $S$  можливих схем їх вмикання. Вектор керування КЦ визначимо як

$$\mathbf{u} = (\mathbf{s}, \mathbf{n}), \quad \mathbf{s} = (s_1, \dots, s_{N_{ГПА}}), \\ \mathbf{n} = (n_1, \dots, n_{N_{ГПА}}), \quad (1)$$

де  $\mathbf{s}$  – вектор булевих змінних, що визначають робочу структуру цеху. Тут  $N_{ГПА}$  – кількість ГПА КЦ, а  $s_i = 1$ , якщо  $i$ -й ГПА працює “на магістраль”, та  $s_i = 0$ , якщо він зупинений або працює “на кільце”. Вектор  $\mathbf{n}$  – це вектор частоти обертання валів ВЦН ГПА КЦ, причому

$$n_i = 0, \quad \text{якщо} \quad s_i = 0; \\ n_i > 0, \quad \text{якщо} \quad s_i = 1.$$

Нехай режим роботи КЦ характеризується критерієм  $J = J(P_{вх}, P_{вих}, T_{вх}, q_{КЦ}, t_a, P_a, \mathbf{s}, \mathbf{n})$ . Критерієм може виступати як окремий показник якості, ефективності та надійності режиму, так і який-небудь спосіб узагальнений [5].

У загальному вигляді задачу оптимізації режиму роботи КЦ можна сформулювати як

$$J(P_{вх}, P_{вих}, T_{вх}, q_{КЦ}, t_a, P_a, \mathbf{s}, \mathbf{n}) = \\ = J(\mathbf{k}, \mathbf{s}, \mathbf{n}) \rightarrow \min_{\mathbf{s}, \mathbf{n} \in \Omega_{КЦ}}, \quad (2)$$

де  $\mathbf{k} = (P_{вх}, P_{вих}, T_{вх}, q_{КЦ}, t_a, P_a)$  – вектор заданих параметрів режиму роботи КЦ, а область допустимих рішень  $\Omega_{КЦ}$  визначається математичною моделлю КЦ. Задача структурної оптимізації КЦ полягає у відшукуванні такої структури цеху  $\mathbf{s}^*$ , вибір якої надавав би мінімум критерію  $J$ :

$$\mathbf{s}^* = \arg \min_{\mathbf{s} \in \Omega_{КЦ}} J(\mathbf{k}, \mathbf{s}, \mathbf{n}^*(\mathbf{k}, \mathbf{s})), \quad (3)$$

де  $\mathbf{n}^*(\mathbf{k}, \mathbf{s})$  – вектор оптимальних значень частоти обертання вала ВЦН ГПА КЦ за структури

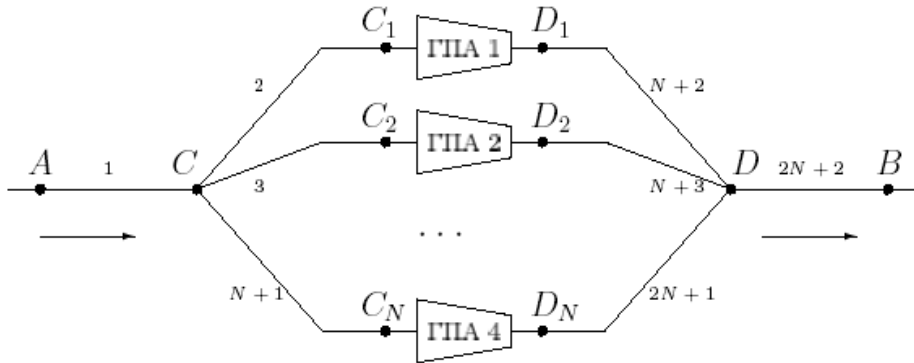


Рисунок 1 — Схема еквівалентної моделі компресорного цеху

$s$ , що задана. Пошук  $\mathbf{n}^*(\mathbf{k}, s)$  назвемо задачею параметричної оптимізації КЦ:

$$\mathbf{n}^*(\mathbf{k}, s) = \arg \min_{\mathbf{n} \in \Omega_{KC}} J(\mathbf{k}, s, \mathbf{n}). \quad (4)$$

**Структурна оптимізація режиму роботи КЦ.** Використовуючи методику побудови області допустимих режимів роботи (ОДР) КЦ [2], за заданими  $P_{вх}$ ,  $P_{вх}$ ,  $T_{вх}$ ,  $t_a$  та  $P_a$  обчислимо значення мінімально та максимально допустимої продуктивності КЦ ( $q_{KC}^-(\mathbf{k}, s)$ ,  $q_{KC}^+(\mathbf{k}, s)$ ) для кожної з структур  $s \in S$ . Із усіх можливих схем відберемо множину  $S_d$  допустимих, за яких буде забезпечена потрібна продуктивність КЦ  $q_{KC}$ :

$$S_d = \{s \in S : q_{KC}^-(\mathbf{k}, s) \leq q_{KC} \leq q_{KC}^+(\mathbf{k}, s)\}. \quad (5)$$

Для кожної структури  $s \in S_d$  вирішимо задачу параметричної оптимізації, тобто знайдемо вектор найліпших значень параметрів  $\mathbf{n}^*(s)$  та значення критерію  $J(s, \mathbf{n}^*(s))$ , що йому відповідає. Оптимальною структурою цеху будемо вважати ту, що надає мінімальне значення критерію  $J$ :

$$s^* = \arg \min_{s \in S_d} J(\mathbf{k}, s, \mathbf{n}^*(\mathbf{k}, s)). \quad (6)$$

**Параметрична оптимізація режиму роботи КЦ.** Задання параметра  $\mathbf{n}$  для ГПА КЦ за незмінних тиску та температури на вході та виході цеху єдиним способом визначає продуктивність кожного ГПА. Іншими словами, задача параметричної оптимізації режиму роботи КЦ є задачею оптимального розподілення навантаження між ГПА КЦ, яку можна формалізувати як задачу нелінійного математичного програмування

$$J(\mathbf{k}, s, \mathbf{q}) \rightarrow \min_{\mathbf{q} \in \Omega_q}, \quad (7)$$

$$\Omega_q : q_i^-(\mathbf{k}, s, \mathbf{q}) \leq q_i \leq q_i^+(\mathbf{k}, s, \mathbf{q}), \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{KC}} q_i = q_{KC} = \text{const}, \quad (9)$$

де:  $\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_{N_{KC}})$  – вектор шуканих витрат газу через кожний з  $N_{KC}$  ВЦН ГПА КЦ;

$q_i^-(\mathbf{k}, s, \mathbf{q})$  та  $q_i^+(\mathbf{k}, s, \mathbf{q})$  – мінімально та максимально допустимі значення продуктивності ЦБН ГПА. Нехай, для визначеності,  $J$  – критерій, що характеризує економічну ефективність режиму, чисельно рівний сумарній витраті паливного газу по КЦ:

$$J(\mathbf{k}, s, \mathbf{q}) = G_{KC}(\mathbf{k}, s, \mathbf{q}) = \sum_{i=1}^{N_{GPA}} s_i G_i(P_{вх}, P_{вх}, T_{вх}, t_a, P_a, q_i), \quad (10)$$

де  $G_i$  – витрата паливного газу на  $i$ -м ГПА за заданих атмосферних умов та параметрів потоку газу на вході та виході ВЦН [6].

За базову математичну модель КЦ візьмемо модель, наведену в [4], та модифікуємо її з урахуванням витрат напору та зміни температури газу на обв'язці та на допоміжному обладнанні КЦ (АПО, УОГ и пр.) У процесі моделювання стаціонарного режиму роботи КЦ математичні моделі ГПА (див., наприклад, [6]), пропонується об'єднувати за допомогою моделей еквівалентних ділянок трубопроводу згідно зі схемою, зображеною на рис. 1. Модель еквівалентної ділянки включає залежності зміни напору і температури газу від продуктивності. У результаті система рівнянь моделі КЦ для обчислення  $J$  має вигляд:

$$P_A^2 - P_C^2 = \lambda_{AC} q_{KC}^2, \quad (11)$$

$$P_C^2 - P_{C_i}^2 = \lambda_{CC_i} q_i^2, \quad i = 1, \dots, N_{GPA}, \quad (12)$$

$$P_{D_i}^2 - P_D^2 = \lambda_{D_i D} q_i^2, \quad i = 1, \dots, N_{GPA}, \quad (13)$$

$$P_D^2 - P_B^2 = \lambda_{DB} q_{KC}^2, \quad (14)$$

$$T_C = T_A \exp(-\alpha_{AC} q_{KC}^{-1}), \quad (15)$$

$$T_{C_i} = T_C \exp(-\alpha_{CC_i} q_i^{-1}), \quad i = 1, \dots, N_{GPA}, \quad (16)$$

$$q_i = f_i(P_{C_i}, T_{C_i}, P_{D_i}, n_i), \quad i = 1, \dots, N_{GPA}, \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{GPA}} q_i = q_{KC}, \quad (18)$$

$$G_i = g_i(P_{C_i}, T_{C_i}, P_{D_i}, P_a, t_a, n_i), \quad i = 1, \dots, N_{GPA}, \quad (19)$$

де явний вид функцій  $f_i$  та  $g_i$  визначається математичною моделлю ГПА;  $\lambda_{AC}$ ,  $\lambda_{CC_i}$ ,  $\lambda_{D_iD}$ ,  $\lambda_{DB}$  і  $\alpha_{AC}$ ,  $\alpha_{CC_i}$  – узагальнені коефіцієнти гідравлічного і термічного опору для відповідних еквівалентних ділянок, значення яких можна визначити за даними експлуатації КЦ.

Система (11)-(19) має  $5N_{ГПА} + 4$  рівнянь та  $5N_{ГПА} + 3$  змінних. Одне рівняння – «зайве», наприклад, (18), тому що  $q_{КЦ}$  не є незалежною змінною, а повністю визначається через  $q_i$ . Елементарними підстановками можна легко звести систему (11)-(19) до системи, що буде мати лише  $2N_{ГПА}$  невідомих та  $2N_{ГПА}$  рівнянь. На першому кроці з (11)-(18) отримаємо

$$P_A^2 - P_{C_i}^2 = \lambda_{AC} q_{КЦ}^2 + \lambda_{CC_i} q_i; \quad (20)$$

$$P_{D_i}^2 - P_B^2 = \lambda_{D_iD} q_i^2 + \lambda_{DB} q_{КЦ}^2; \quad (21)$$

$$T_{C_i} = T_A \exp(-\alpha_{AC} q_{КЦ}^{-1}) \exp(-\alpha_{CC_i} q_i^{-1}); \quad (22)$$

$$q_i = f_i(P_{C_i}, T_{C_i}, P_{D_i}, n_i), \quad i = 1, \dots, N_{ГПА} \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{ГПА}} q_i = q_{КЦ}. \quad (24)$$

Виразимо  $P_{C_i}$ ,  $T_{C_i}$  і  $P_{D_i}$  з (20)-(22) та підставимо їх та  $q_{КЦ}$  з (24) в (23). З урахуванням (19) буде

$$q_i = f_i(\varphi_1(\mathbf{q}), \varphi_2(\mathbf{q}), \varphi_3(\mathbf{q}), n_i); \quad (25)$$

$$G_i = g_i(\varphi_1(\mathbf{q}), \varphi_2(\mathbf{q}), \varphi_3(\mathbf{q}), P_a, t_a, n_i), \quad (26)$$

$$i = 1, \dots, N_{ГПА},$$

де  $\varphi_1(\mathbf{q})$ ,  $\varphi_2(\mathbf{q})$ ,  $\varphi_3(\mathbf{q})$  – деякі функції, що отримано в результаті підстановок.

Розв'язавши  $N_{ГПА}$  незалежних рівнянь (25) відносно  $n_i$  за заданим  $\mathbf{q}$ , легко обчислити  $N_{ГПА}$  значень  $G_i$  згідно з (26).

Зараз, коли визначено порядок обчислення  $J(\mathbf{k}, \mathbf{s}, \mathbf{q})$ , приступимо до розробки методу розв'язання задачі (7)-(9). Через значну складність функціонала  $J(\mathbf{k}, \mathbf{s}, \mathbf{q})$  бажано використовувати який-небудь з методів оптимізації нульового порядку. За основу візьмемо комплексний метод Бокса [7] мінімізації функціонала декількох змінних  $y(\mathbf{x})$ , де  $\Omega_{\mathbf{x}}$  визначається системою явних і неявних обмежень:

$$y(\mathbf{x}) \rightarrow \min, \quad \mathbf{x} \in \Omega_{\mathbf{x}} \quad (27)$$

$$\Omega_{\mathbf{x}}: x_i^- \leq x_i \leq x_i^+, \quad i = 1, \dots, n, \quad (28)$$

$$f_j(\mathbf{x}) \leq f_j^+, \quad j = 1, \dots, m. \quad (29)$$

Модифікуємо цей метод з урахуванням обмежень (8) і (9) замість (28) і (29). Обмеження (9) визначає гіперплощину, до якої має належати шукане рішення. Це означає, що всі точки вихідного комплексу, що формується згідно з методом Бокса, мають лежати в цієї площині, щоб бути допустимими. Оскільки рух точок комплексу відбувається тільки вздовж прямих, що належать до цієї площини, то очевидно, що всі нові точки автоматично будуть належати цій гіперплощині. Тому після формування вихідного комплексу вже немає необхідності перевіряти умову допустимості (9) для кожної нової точки.

У методі Бокса припущено, що в разі порушення обмеження (28) значення  $x_i$  буде замінено відповідно на  $x_i^-$  або  $x_i^+$ . За наявності обмеження (8) така заміна неприйнятна, оскільки зміна  $q_i$  викликає зміну  $q_i^-(\mathbf{k}, \mathbf{s}, \mathbf{q})$  і  $q_i^+(\mathbf{k}, \mathbf{s}, \mathbf{q})$ . Тому пропонується змішувати недопустиму точку  $x_i$  на половину відстані до центра віги комплексу, що, окрім іншого, утримує її в площині обмеження (9).

Якщо функції  $y(\mathbf{x})$  та  $f_j(\mathbf{x})$  випуклі, то задача (27)-(29) буде мати єдине рішення [7]. Для задачі (7)-(9) можна впевнено стверджувати, що за будь-яких технологічно допустимих значень аргументів функція  $J(\mathbf{k}, \mathbf{s}, \mathbf{q})$  випукла та монотонно зростає.

Розглянемо залежності  $G_1(q_1)$ ,  $G_2(q_2)$  та  $G_{КЦ}(\mathbf{q})$  для КЦ з 2-ма паралельно включеними однаковими ГПА-Ц-6.3С/56-1.45ДТ-71П за умов  $q_{КЦ} = q_1 + q_2 = 800$  тис.м<sup>3</sup>/час,  $P_A = 3.8$  МПа,  $T_A = 15^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon = P_{вих}/P_{вх} = 1.35$ ,  $t_a = 15^\circ\text{C}$ . Випадок, зображений на рис. 2, надає типові рішення для задач розподілення навантаження між однаковими енергетичними установками – ділити навантаження порівну. Випуклі залежності  $G_i(q_i)$  надають випуклості  $G_{КЦ}(\mathbf{q})$  та визначають наявність глибокого мінімуму ( $G_{КЦ}^- \ll G_{КЦ}^+$ ) у точці  $q_1 = q_2 = 0.5q_{КЦ}$ . За інших умов (див. рис. 3) виявляється, що залежність  $G_{КЦ}(\mathbf{q})$  практично лінійна в допустимих інтервалах по  $q_i$ , тобто  $G_{КЦ}^- \approx G_{КЦ}^+$  (точками відзначені мінімуми відповідних залежностей).

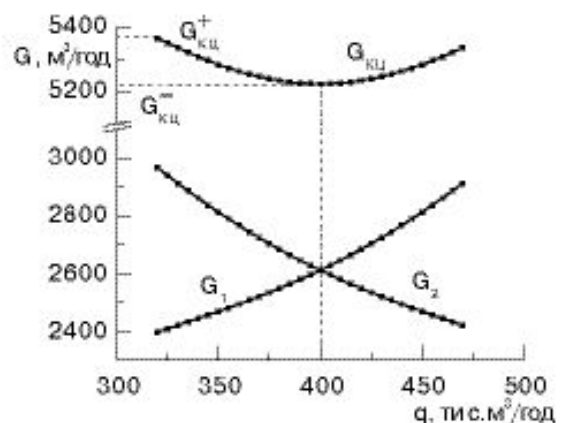


Рисунок 2 — Залежність  $G_{КЦ}(q_1)$

за умов  $\varepsilon = P_{вих}/P_{вх} = 1.35$

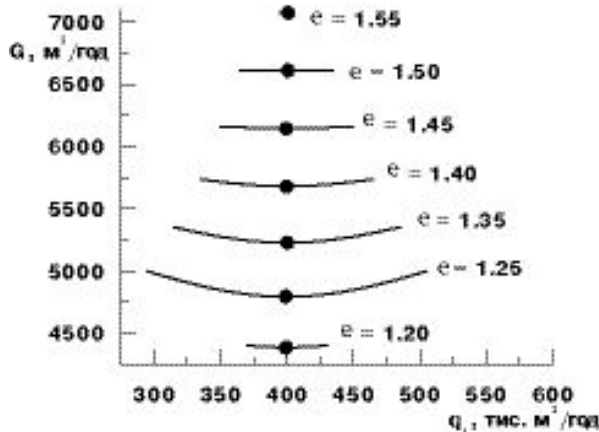


Рисунок 3 — Залежності  $G_{KЦ}(q_1, \varepsilon)$  для КЦ з двома однаковими ГПА

З аналізу функції  $G_{KЦ}(q)$  за обмежень (8) і (9) випливає, що вирішальну роль у тому, яка буде різниця  $(G_{KЦ}^- - G_{KЦ}^+)$ , грають фактично допустимі діапазони  $U_i$  варіювання значень  $q_i$  (наприклад, для рис. 2  $U = U_1 = U_2 = [321, 479]$ , оскільки ГПА однакові). Нехай I і II – це різні набори значень параметрів  $P_A$ ,  $T_A$ ,  $\varepsilon$ ,  $t_a$  і  $q_{KЦ}$ . Запишемо

$$U^{(I)} > U^{(II)} \Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial^2 G^{(I)}}{\partial q_i^2} > \frac{\partial^2 G^{(II)}}{\partial q_i^2}, & i=1, \dots, N_{ГПА} \\ dG^{(I)} > dG^{(II)}, \end{cases}$$

де  $dG = \frac{G_{KЦ}^+ - G_{KЦ}^-}{G_{KЦ}^-} 100\%$  чисельно характеризує «глибину» мінімуму, а з технологічної точки зору – максимальний економічний ефект від вирішення задачі параметричної оптимізації КЦ за заданих умов. Чим більший діапазон, тим більший ефект може дати оптимізація.

Можна виділити два фактори, що зумовлюють ширину діапазонів  $U_i$ : граничні значення ОДР КЦ  $q_{KЦ}^-$  та  $q_{KЦ}^+$ ; положення  $q_{KЦ}$  відносно них. Зміна довжини відрізка  $[q_{KЦ}^-, q_{KЦ}^+]$  відбувається або під час зміни тиску на виході КЦ  $P_{вих}$ , що стабілізується, або під час зміни  $t_a$ , тобто під час зміни максимально допустимої потужності ГТУ.

Для дослідження властивостей функції  $G_{KЦ}(q)$  розроблений метод розв'язання задачі (7)-(9) було змінено для вирішення задачі вигляду

$$J(k, s, q) \rightarrow \max_{q \in \Omega_q}$$

На рис. 4 зображено результати пошуку мінімальної ( $G_{KЦ}^-$ ) та максимальної ( $G_{KЦ}^+$ ) сумарної по КЦ витрати паливного газу залежно від потрібної продуктивності КЦ  $q_{KЦ}$  за різних

значень ступеня стиску  $\varepsilon$ . Ясно видно, як сукупність  $q_{KЦ}$  та  $\varepsilon$  зумовлюють величину «засору» між лініями  $G_{KЦ}^-$  і  $G_{KЦ}^+$ , тобто величину  $dG$  (див. рис. 5).

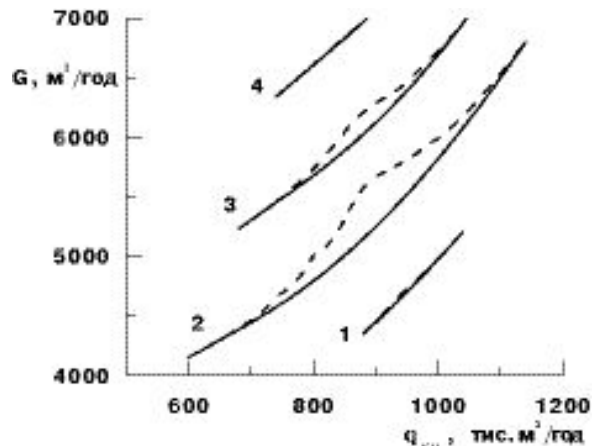


Рисунок 4 — Залежності  $G_{KЦ}^-(q_{KЦ}, \varepsilon)$  (безперервні лінії) та  $G_{KЦ}^+(q_{KЦ}, \varepsilon)$  (пунктир) за  $\varepsilon$ , що дорівнює 1) 1.2; 2) 1.3; 3) 1.4; 4) 1.5

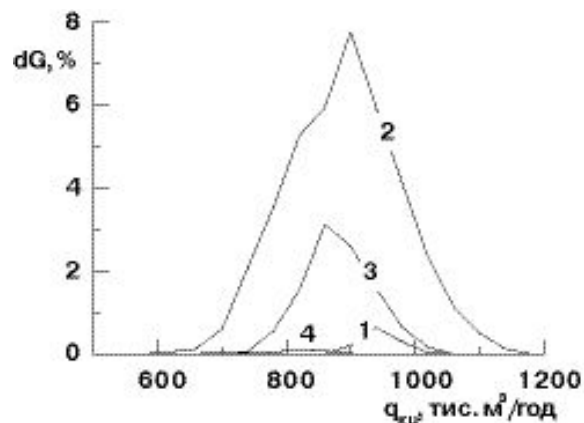


Рисунок 5 — Залежності  $dG_{KЦ}(q_{KЦ}, \varepsilon)$  за  $\varepsilon$ , що дорівнює 1) 1.2; 2) 1.3; 3) 1.4; 4) 1.5

Якщо характеристики ГПА розрізняються на  $k\%$ , то оптимальне розподілення навантаження вже не буде симетричним. На рис. 6 та 7 зображено залежності  $G_{KЦ}(q)$  за двох паралельно включених ГПА КЦ, чий характеристики потужності відрізняються на  $10\%$ .

Введемо міру зсуву точки оптимального розподілення навантаження ( $q_1^*$  для ГПА 1) від точки рівномірного розподілення  $q^-$  (див. рис. 6):

$$\Delta q = \frac{q_1^* - q_1^-}{q_1^-} 100\%, \quad q^- = \frac{q_{KЦ}}{N(s)} \mathbf{I}$$

де:  $\mathbf{I}$  – одиничний вектор, а  $N(s)$  – кількість ГПА у режимі „на магістраль” за структури цеху  $s$ . Введемо також міру помилки, що виникає із заміною дійсного оптимального значення  $q_1^*$  рівномірним розподіленням:

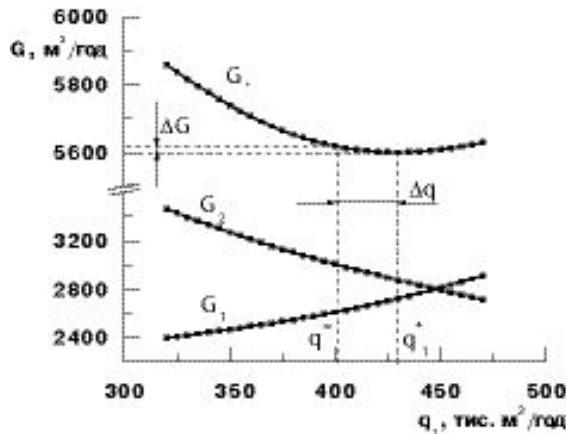


Рисунок 6 — Залежність  $G_{KC}(q_1)$  за  $k = 10\%$ ,  $\varepsilon = 1.35$

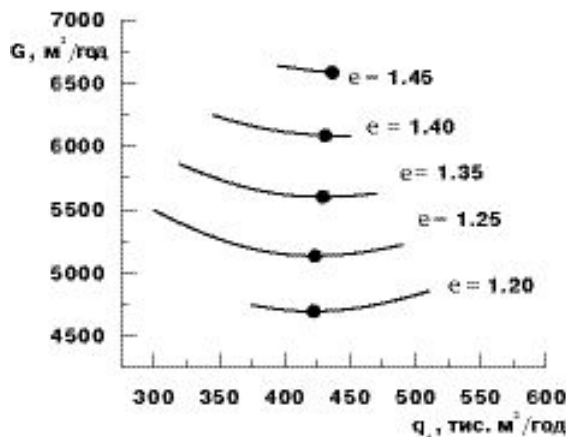


Рисунок 7 — Залежності  $G_{KC}(q_1, \varepsilon)$  для КЦ з двома неоднаковими ГПА ( $k = 10\%$ )

$$\Delta G = \frac{G_{KC}(q_1^*) - G_{KC}^-}{G_{KC}^-} 100\%.$$

На рис. 8 зображено залежності  $\Delta q$  і  $\Delta G$  від  $\varepsilon$ , з аналізу яких випливає, що якщо навіть розбіжність по  $q$  велика ( $\Delta q \gg 1$ ), то точність оцінювання  $G_{KC}^-$  при заміні  $q^*$  на  $q^-$  практично не втрачається ( $\Delta G \approx 0$ ). Тут розглядається випадок  $k = 10\%$ , оскільки майже немає КЦ, в яких ГПА відрізняються за своїми характеристиками більш ніж на 10%.

#### Оптимізація режиму роботи компресорної станції

**Формалізація задачі.** У процесі оптимізації режиму роботи КС відомими будемо вважати: тиск газу  $P_A$  на вході та  $P_B$  на виході КС; продуктивність КС  $q_{KC}$ ; температуру  $T_A$  газу на вході КС; температуру  $t_a$  і тиск  $P_a$  атмосферного повітря; характеристики ГПА КС і множину  $S_{KC}$  можливих схем їх включення. У даній статті розглядається КС, які складаються з  $N_{KC}$  КЦ, що працюють паралельно на одну нитку. Вектор управління такою КС визначимо як

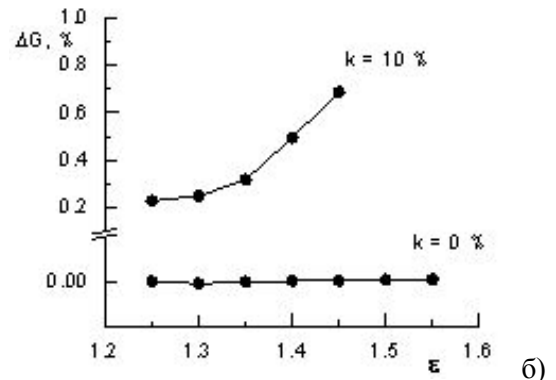
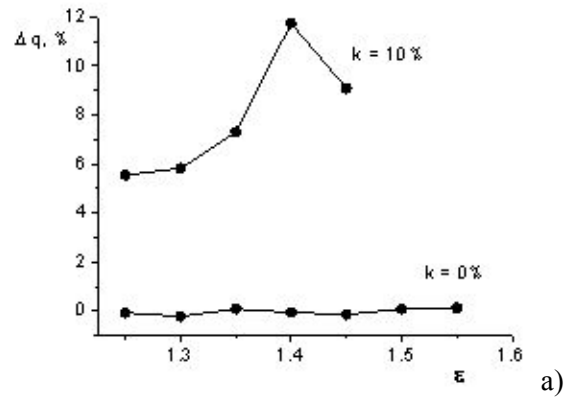


Рисунок 8 — Залежність  $\Delta q(\varepsilon)$  (а) та  $\Delta G(\varepsilon)$  (б) КЦ з двома однаковими ( $k = 0\%$ ) і різними ( $k = 10\%$ ) ГПА

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{KC} &= (\mathbf{s}_{KC}, \mathbf{n}_{KC}), \\ \mathbf{s}_{KC} &= (s_1, \dots, s_{N_{KC}}), \\ \mathbf{n}_{KC} &= (n_1, \dots, n_{N_{KC}}). \end{aligned}$$

Оптимізація планового режиму роботи КС полягає у виборі структури станції  $\mathbf{s}_{KC}^*$  і параметрів режиму  $\mathbf{n}_{KC}$ , за яких значення деякого критерію  $J(\mathbf{k}_{KC}, \mathbf{s}_{KC}, \mathbf{n}_{KC})$ , що характеризує режим роботи КС, було б мінімальним.

**Структурна оптимізація режиму роботи КС.** Алгоритм розв'язання задачі структурної оптимізації режиму роботи КС майже нічим не відрізняється від алгоритму вибору оптимальної структури КЦ: перебрати усі можливі структури  $\mathbf{s}_{KC} \in S_{KC}$  та відібрати з них множину  $S_d$  допустимих:

$$S_d = \{ \mathbf{s}_{KC} \in S_{KC} :$$

$$q_{KC}^-(\mathbf{k}_{KC}, \mathbf{s}_{KC}) \leq q_{KC} \leq q_{KC}^+(\mathbf{k}_{KC}, \mathbf{s}_{KC}) \}.$$

Для кожної схеми  $\mathbf{s}_{KC} \in S_d$  вирішимо задачу параметричної оптимізації, тобто знайдемо найліпше розподілення навантаження  $\mathbf{n}_{KC}^*(\mathbf{s}_{KC})$ ,  $J(\mathbf{s}_{KC}, \mathbf{n}_{KC}^*(\mathbf{s}_{KC}))$ . За оптимальну структуру КС візьмемо ту, що надає мінімальне значення критерію  $J$ :

$$\mathbf{s}_{KC}^* = \arg \min_{\mathbf{s}_{KC} \in S_d} J(\mathbf{k}_{KC}, \mathbf{s}_{KC}, \mathbf{n}_{KC}^*(\mathbf{k}_{KC}, \mathbf{s}_{KC})). \quad (30)$$

**Параметрична оптимізація режиму роботи КС.** За аналогією з КЦ задачу параметричної оптимізації режиму роботи КС можна сформулювати як задачу нелінійного математичного програмування вигляду

$$J(\mathbf{k}_{KC}, \mathbf{s}_{KC}, \mathbf{q}_{KC}) \rightarrow \min_{\mathbf{q} \in \Omega_q}, \quad (31)$$

$$\Omega_q: q_{KCi}^-(\mathbf{k}_{KC}, \mathbf{s}_{KC}, \mathbf{q}_{KC}) \leq q_{KCi} \leq q_{KCi}^+(\mathbf{k}_{KC}, \mathbf{s}_{KC}, \mathbf{q}_{KC}), \quad (32)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{KC}} q_{KCi} = q_{KC} = \text{const}. \quad (33)$$

При  $J = G_{KC}$  для обчислення функції  $G_{KC}$  необхідно розв'язати систему, що відповідає математичній моделі КС, яка будується аналогічно моделі КЦ, але за нульовими довжинами дільниць АС та DB (оскільки зазвичай немає штатних замірів параметрів газу в точках С і В схеми рис. 1).

$$P_A^2 - P_{Ci}^2 = \lambda_{ACi} q_{KCi}^2,$$

$$P_{Di}^2 - P_B^2 = \lambda_{DiB} q_{KCi}^2,$$

$$T_{Ci} = T_A \exp(-\alpha_{ACi} q_{KCi}^{-1}),$$

$$\sum_{i=1}^{N_{KC}} q_{KCi} = q_{KC},$$

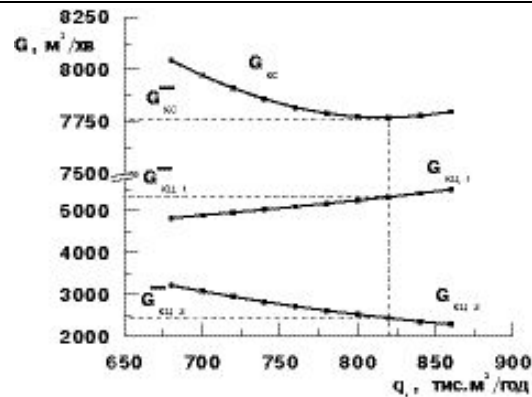
$$G_{KCi} = f_{Gi}(\mathbf{s}_{KCi}, q_{KCi}, P_{Ci}, T_{Ci}, P_{Di}, P_a, t_a), \quad i = 1, \dots, N_{KC}.$$

Тут обчислення  $G_{KCi}$  аналогічно розв'язанню системи (11)-(19), що докладно описано вище. Застосування модифікованого методу Бокса дає змогу знаходити  $G_{KC}^-$  і  $G_{KC}^+$ , де у внутрішніх циклах алгоритму використовується описаний вище метод параметричної оптимізації режиму цеху за заданих структури, продуктивності та параметрах газу на вході та виході КС.

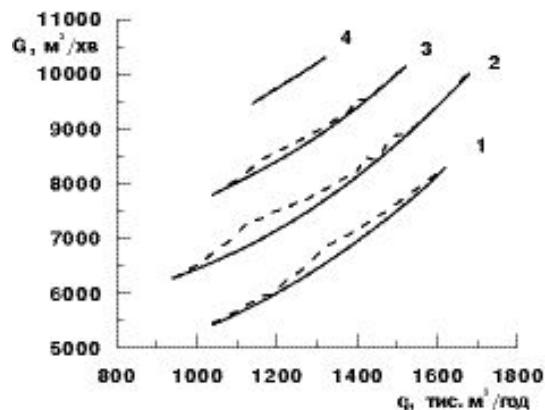
Дослідимо режими роботи двоцехової КС, у першому цеху якої встановлено три ГПА-Ц-6.3С/56-1.45ДТ-71П, а в другому – два ГПА-Ц-6.3/76-1.45. Покладемо  $P_A = 3.8$  МПа,  $T_A = 15$  °С.

Як бачимо на рис. 9, оптимальне розподілення навантаження між цехами за заданої структури КС не можна замінити на рівномірне, оскільки характеристики різних КЦ зазвичай відрізняються в декілька разів за рахунок різної кількості та типів встановлених ГПА. А оптимізувати режими роботи КС бажано, тому що це може дати значний економічний ефект (див. рис. 10).

На рис. 11 бачимо, що вибір тієї або іншої структури КС суттєво впливає на стратегію оптимального розподілення навантаження між цехами. Залежність  $G_{KC}^-(\mathbf{s})$  є кусково-неперервною, тому класичні методи пошуку екстремуму тут неприйнятні. Найпростіше реалізувати перебір



**Рисунок 9 — Залежність витрати паливного газу від розподілення навантаження між цехами КС за умов  $\mathbf{s} = (110, 01)$ ,  $\varepsilon = 1.35$ ,  $q_{KC} = 1200$  тис.м³/год, а також оптимальне значення  $G_{KC}^-$**



**Рисунок 10 — Залежність  $G_{KC}^-(q_{KC}, \varepsilon)$  (неперервні лінії) і  $G_{KC}^+(q_{KC}, \varepsilon)$  (пунктир) за  $q_{KC} = 1200$  тис.м³/год і  $\varepsilon$ , що дорівнює 1) 1.2; 2) 1.3; 3) 1.4; 4) 1.5**

усіх структур, але при великій кількості ГПА КС їх може виявитися так багато, що розрахунок потребуватиме значних витрат машинного часу. Тому при однакових ГПА КЦ пропонується характеризувати структуру КС не вектором булевих змінних, а кількістю працюючих ГПА в кожному КЦ (див. табл. 1, що відповідає рис. 11).

За фіксованої структури КС функція  $G_{KC}^-(\mathbf{q}_{KC})$  монотонно зростає (див. рис. 12). Внаслідок можливості вибору структури КС можна одержати значно краще значення критерію  $J$ , але залежності, що отримуються, мають кусково-неперервний характер, де розриви відповідають зміні структури КС (див. рис. 13 (а) і табл. 2).

Звичайно у практиці диспетчерського керування необхідно розв'язувати задачу структурної і параметричної оптимізації режиму роботи КС на заданій продуктивності  $q_{KC}$  та різних значеннях тиску на її виході. Якщо параметри потоку газу на вході КС є фіксованими, то залежність  $J(\varepsilon)$  має вигляд, що зображений на рис. 13 (б).

Таблиця 1

№s	N1	N2	$G_{KC1}^-$	$G_{KC2}^-$	$G_{KC}^-$
0	2	0	6283	6283	0
1	2	0	6283	6283	--
2	2	0	6283	6283	--
3	3	0	7252	7252	--
4	1	1	6176	3165	3011
5	1	1	6176	3162	3013
6	2	1	7048	4750	2298
7	1	1	6176	3175	3000
8	2	1	7048	4752	2296
9	2	1	7048	4752	2296
10	1	1	6176	3162	3013
11	1	1	6176	3160	3016
12	2	1	7048	4747	2301
13	1	1	6176	3165	3011
14	2	1	7048	4749	2299
15	2	1	7048	4750	2298
16	0	2	6186	4750	6186
17	1	2	6919	2363	4556
18	1	2	6919	2363	4555
19	1	2	6919	2363	4555

Таблиця 2

$q_{KC}$	N1	N2	$G_{KC}^-$
320	1	0	2332
340	0	1	2288
--	--	--	--
520	0	1	3217
540	1	0	3366
560	1	0	3512
640	2	0	4691
660	1	1	4621
680	0	2	4586
--	--	--	--
960	0	2	5925
980	1	1	6050
--	--	--	--
1060	1	1	6583
1080	2	0	6835
1100	2	0	6985
1120	1	2	7330
--	--	--	--
1600	1	2	9981
1620	2	1	10202
1640	2	2	10478
--	--	--	--
2120	2	2	13303
2140	3	2	13709
--	--	--	--
2660	3	2	16985

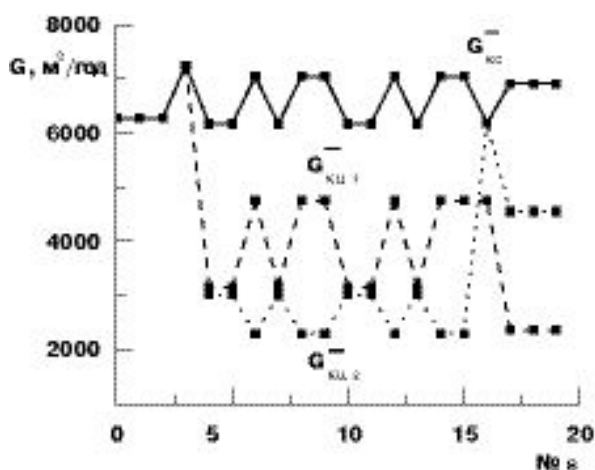


Рисунок 11 — Залежності  $G_{KC}^-$ ,  $G_{KC1}^-$ ,  $G_{KC2}^-$  від структури КС за  $q_{KC} = 1200$  тис.м³/год і  $\varepsilon = 1.35$

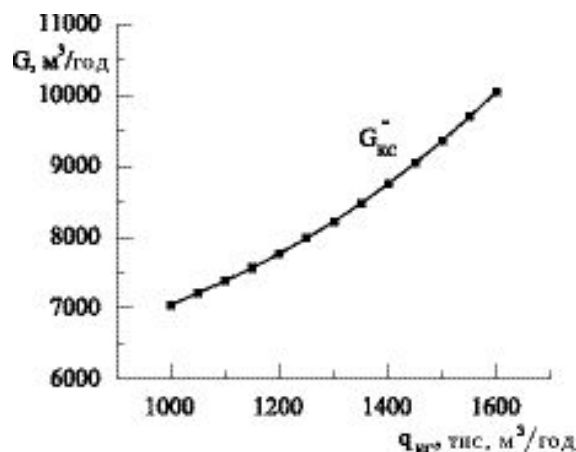


Рисунок 12 — Результати параметричної оптимізації за різної продуктивності КЦ та заданих  $s = (2,1)$  і  $\varepsilon = 1.35$

### Висновки

У статті наведено формальну постановку задачі структурної та параметричної оптимізації режиму роботи компресорного цеху та багатощаблевої компресорної станції. Запропоновано ефективний метод розв'язання цієї задачі та проведено ряд чисельних досліджень властивостей одержаних рішень.

На підставі одержаних у статті результатів можна зробити загальний висновок про те, що в постановці задачі оптимізації режиму роботи КЦ (3)-(4) та у використанні моделі КЦ (11)-(19) незалежно від того, встановлено в КЦ однакові чи різні ГПА, можна нерозв'язувати задачу параметричної оптимізації КЦ, а розраховувати значення критерію  $J(\mathbf{k}, \mathbf{s}, \mathbf{q})$  згідно з (10) рівномірному розподілу навантаження між тими ГПА, які включені у заданій структурі

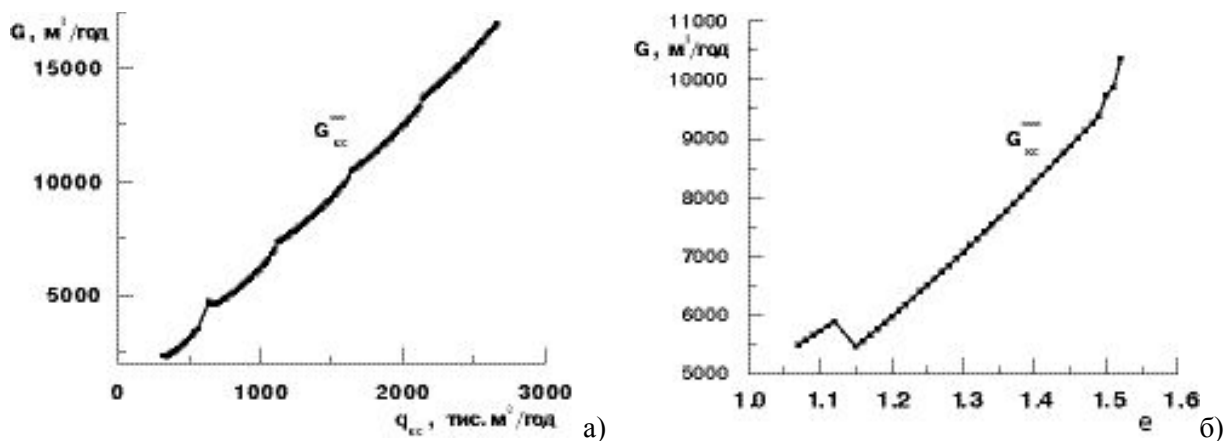


Рисунок 13 — Результати структурної та параметричної оптимізації КС (а) за фіксованого ступеня стисання  $\varepsilon = 1.35$  і б) за фіксованої продуктивності  $q_{KC} = 1200$  тис.м<sup>3</sup>/год

цеху  $s$ . Втрата точності оцінювання  $J$  за такого підходу незначна (за виконання умови  $q_{KC}^- \leq q_{KC} \leq q_{KC}^+$ ).

Під час розв'язання задачі оптимізації режиму роботи багатоцехової КС одноститкового МГ таке спрощення може надати рішення, що далеке від оптимального, тому на практиці слід рекомендувати проводити оптимізацію режиму роботи КС. Але для ефективного розв'язання цієї задачі треба ще вирішити ряд проблем, що потребують подальшого дослідження, а саме: розробка якісних методів урахування зміни тиску і температури газу на об'язці та допоміжному обладнанні КС, урахування апріорної невизначеності параметрів режиму роботи КС та методів моделювання режиму роботи КС багато ститкового МГ.

### Література

1. Панкратов В.С., Герке В.Г., Сарданашвили С.А., Митичкин С.К. Комплекс моделирования и оптимизации режимов работы ГТС. — М.: ООО ИРЦ Газпром, 2002. — 56 с.

2. Ковалко М.П., Грудз В.Я., Михалків В.Б. та ін. Трубопроводный транспорт газа. — К.: Агентство з раціонального використання енергії та екології, 2002. — 600 с.

3. Дубинський А.В., Константинова И.М., Фридман В.Е. О постановке и решении многокритериальных задач оптимизации транспорта газа // Газовая промышленность. — 1982. — №6. — С.5-7.

4. Селезнев В.Е., Алешин В.В., Клишин Г.С. Методы и технологии численного моделирования газопроводных систем. — М.: Едиториал УРСС, 2002. — 448 с.

5. Константинова И.М., Дубинський А.В., Дубровский В.В. и др. Математическое моделирование технологических объектов магистрального транспорта газа. — М.: Недра, 1988. — 192 с.

6. Сухарев М.Г., Карасевич А.М., Технологический расчет и обеспечение надежности газо- и нефтепроводов. — М.: ГУП Издательство Нефть и газ РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, 2000. — 272с.

7. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс.: Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1988. — 128 с.

© 2004 рік. Всі права захищені.  
Друк здійснено на екологічно чистих паперах.  
Відсутність реклами не є гарантією відсутності порушень авторських прав.

Ваша реклама в нашому журналі  
допоможе вам знайти нових клієнтів  
та розширити свій бізнес.

Редакція журналу запрошує до співпраці спеціалістів нафтогазової галузі, котрі бажають опублікувати свої матеріали.

Будемо раді допомогти Вам налагодити ділові контакти через опублікування у нашому журналі реклами продукції та розробок Вашого підприємства.

**Сподіваємось, що Ви передплатите наш журнал на 2004 рік.**

Наша адреса: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу